



Simulasi Numerik Pelacakan Elevasi Kolam Datar Pada Fenomena Hidrologi Jangka Pendek Dengan Metode Runge-Kutta Orde 4 (Studi Kasus: Situ Agathis Universitas Indonesia)

Ngakan Putu Purnaditya^{1,*}

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Indonesia¹

Koresponden*, Email: purnaditya@untirta.ac.id

Info Artikel		Abstract
Diajukan	3 Maret 2020	<p><i>Level pool routing is one of analysis to evaluate the storage of the reservoir, no exception to the cascade pond system. The hydrological continuation model considers this analysis, and it gives the ordinary differential equation (ODE). ODE generally can be solved numerically, and one of the methods used is the Runge-Kutta 4th Order method. This research conducts the simulation of level pool routing using the Runge-Kutta 4th Order method in Agathis cascade pond Universitas Indonesia. Rainfall analysis using Gumbel gives the design rainfall about 180.6 mm for the 50-yr return period. The discharges inflow estimated by SCS synthetic unit hydrograph for 2-yr, 25-yr, and 50-yr return period. The Runge-Kutta 4th Order simulation gives the maximum water level of Agathis when the stormwater occurs is about 0.8 m above the spillway. The simulation also gives the requirement of storage to maintain the stormwater is about 4400 m³. Depth-volume relationship analysis informs the potential of Agathis storage to maintain stormwater is about 24000 m³. Therefore, through this simulation, it can be concluded that the Agathis condition still has strong capabilities to maintain the stormwater until the 50-yr return period.</i></p>
Diperbaiki	17 Agustus 2020	
Disetujui	19 Agustus 2020	

Keywords: Level Pool Routing, Runge-Kutta Method, SCS Method.

Abstrak

Pelacakan elevasi kolam datar merupakan salah satu analisis untuk melakukan evaluasi suatu tampungan tidak tekecuali pada sistem tampungan bertingkat. Model kontinuitas hidrologi menjadi dasar analisis ini dimana model ini diturunkan sebagai persamaan diferensial biasa (PDB). PDB umumnya dapat dicari solusinya secara numerik dan salah satu metode untuk mencari solusi PDB adalah dengan metode Runge-Kutta Orde 4. Studi ini melakukan simulasi elevasi kolam datar dengan menggunakan Runge-Kutta Orde 4 di Situ Agathis Universitas Indonesia yang merupakan bagian dari sistem tampungan bertingkat. Analisis curah hujan rencana menggunakan distribusi Gumbel yang memberikan nilai curah hujan pada periode ulang 50 tahun sebesar 180.6 mm. Debit inflow diestimasi melalui pendekatan hidrograf satuan sintetis SCS untuk periode ulang 2 tahun, 25 tahun dan 50 tahun. Simulasi Runge-Kutta Orde 4 memberikan level muka air maksimum pada Situ Agathis saat hujan lebat sekitar 0.8 m di atas spillway. Hasil simulasi juga memberikan kebutuhan tampungan untuk penanganan limpasan adalah sekitar 4400 m³. Analisis hubungan antara kedalaman dan volume memberikan gambaran potensi tampungan Situ Agathis adalah 24000 m³. Dengan demikian, melalui simulasi ini dapat disimpulkan bahwa kondisi Situ Agathis masih cukup baik dalam menangani fenomena hidrologi jangka pendek hingga periode ulang 50 tahun.

Kata Kunci: Pelacakan Elevasi Kolam Datar, Metode Runge-Kutta, metode SCS

1. Pendahuluan

Dalam manajemen penanganan limpasan langsung, penerapan sistem tampungan bertingkat (*cascade pond*) merupakan salah satu yang dapat diterapkan di lingkungan perkotaan. Sistem ini berbasis ekosistem daerah tangkapan dengan pola berantai atau *tank chains*. Setiap *cascade* atau tampungan saling terhubung dan terorganisasi dengan tampungan lain sebagai satu kesatuan sistem. Masing-masing *cascade* memiliki daerah tangkapan tersendiri dan berfungsi sebagai penyimpan air serta meneruskan air tersebut ke tampungan berikutnya secara bertingkat [1].

Sistem tampungan bertingkat memiliki kegunaan yang mirip dengan dataran banjir (*floodplain*). Dataran banjir merupakan metode yang efektif dalam menahan/menyimpan debit banjir secara sementara [2]. Dengan kata lain, sistem ini dapat menjaga puncak debit selama fenomena banjir terjadi. Sistem tampungan bertingkat menyimpan debit banjir secara sementara untuk kemudian dikirim/dialirkan ke tampungan berikutnya. Dalam sistem ini, analisis pelacakan banjir (*flood routing*) akan memberikan informasi mengenai debit banjir yang dialirkan menuju tampungan berikutnya secara spasial dan temporal. Analisis pelacakan banjir banyak diterapkan berdasarkan beberapa metode dan pendekatan. pelacakan

elevasi kolam datar merupakan salah satu analisis pelacakan banjir yang dapat diterapkan pada sistem tampungan bertingkat [3]. Hal ini dapat diterima mengingat karakteristik dari sistem tampungan bertingkat mirip dengan tampungan banjir yang umum atau dataran banjir.

Beberapa model pelacakan banjir telah dikembangkan, seperti DUFLOW yang dikembangkan oleh Spaans, dkk (1989) dan DWOPER yang dikembangkan oleh Fread (1978) [3]. Kedua model tersebut sangat aplikatif diterapkan dalam analisis pelacakan banjir di saluran terbuka, dan terkadang disebut sebagai *hydraulic/kinematic flood routing*. Analisis pelacakan elevasi kolam datar (*level pool routing*) diturunkan dari persamaan kontinuitas sebagai persamaan diferensial [4]. Metode numerik dapat dipilih untuk mencari solusi persamaan diferensial tersebut, sebagai contohnya metode *Laurenson-Pilgrim*, metode *Runge-Kutta*, and metode *Cash-Karp* [5]. Analisis elevasi kolam datar (*level pool routing*) memberikan informasi mengenai fluktuasi elevasi muka air di suatu tampungan saat fenomena banjir terjadi. Analisis ini juga dapat menunjukkan fluktuasi volume tampungan, dan keduanya disimulasikan secara *real-time* [6].

Lokasi penelitian ini adalah di Situ Agathis, dimana situ tersebut merupakan bagian dari sistem tampungan bertingkat yang ada di lingkungan Universitas Indonesia. Sistem yang terdiri dari Situ Agathis, Kenanga, Mahoni, Puspa, Ulin dan Salam ini saling terhubung dimana Situ Agathis berada pada daerah hulu dan Situ Salam berada pada daerah hilir sebagai outlet dari sistem ini. **Gambar 1** merupakan peta sistem tampungan bertingkat/*Cascade Pond* di wilayah UI [7]. Setiap Situ memiliki daerah tangkapan tersendiri dan saling terhubung melalui suatu saluran kecil. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengetahui secara teoritis fluktuasi elevasi muka air di Situ Agathis saat fenomena banjir terjadi. Metode *Runge-Kutta* Orde 4 sebagai hidrograf *outflow* dapat mensimulasikan pelacakan banjir. Sementara itu, metode hidrograf satuan sintesis (HSS) SCS mensimulasikan hidrograf *inflow*. Simulasi dilakukan sepanjang periode ulang 50 tahun.

2. Metode

Banjir merupakan fenomena hidrologi jangka pendek mengingat banjir terjadi dalam rentang waktu yang pendek dalam satu siklus kejadian. Isu penting dalam banjir adalah estimasi besarnya debit. Besarnya debit dapat diestimasi menggunakan metode rasional dan metode hidrograf satuan sintesis (HSS) jika tidak tersedianya data pengukuran debit langsung di lapangan. Penelitian ini menggunakan metode hidrograf satuan sintesis dan metode ini dapat melacak

besarnya debit banjir sepanjang waktu banjir. Hidrograf satuan sintesis (HSS) digunakan untuk mengembangkan hidrograf satuan berdasarkan karakteristik DAS di sekitarnya [8], dan metode ini cukup banyak diterapkan untuk daerah-daerah yang tidak memiliki data pengukuran debit langsung di lapangan.

Persamaan Sederhana Geometri Tampungan

Model matematika dapat diterapkan untuk menyatakan hubungan dari volume-area-kedalaman dari suatu *wetland* dan diasumsikan memiliki karakteristik yang sama dengan tampungan tunggal pada sistem bertingkat. Estimasi luas muka air berdasarkan kedalamannya, secara hipotesis dapat diukur melalui persamaan [9]

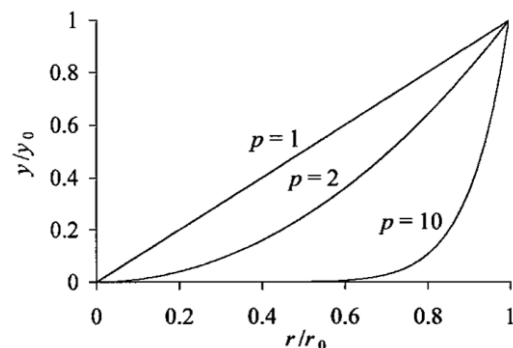
$$A = \pi r_o^2 \left(\frac{h}{h_o} \right)^{2/p} = s \left(\frac{h}{h_o} \right)^{2/p}, \quad (1)$$

dimana $\pi r_o^2 = s$ merupakan luas maksimum dari suatu tampungan. Di sisi lain, volume tampungan berdasarkan fluktuasi kedalaman diberikan oleh [9]

$$V = \frac{s}{(1 + 2/p)} \frac{h^{1+(2/p)}}{h_o^{2/p}}. \quad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) menjelaskan h merupakan kedalaman tertentu dari suatu tampungan dan h_o adalah kedalaman maksimum.

Parameter p ditentukan berdasarkan hubungan antara rasio elevasi dan rasio jari-jari dari tampungan. **Gambar 2** memberikan informasi mengenai parameter p , dimana y elevasi permukaan pada jarak r yang diukur dari pusat/titik berat tampungan, y_o elevasi pada daerah tertentu dari suatu tampungan dan r_o adalah radius terhadap y_o [9].



Gambar 2. Parameter p [9]



Gambar 1. Sistem Tampungan Bertingkat/Cascade Pond UI [7]

Analisis Curah Hujan (Metode Gumbel)

Langkah awal dalam analisis debit banjir adalah menentukan besarnya curah hujan rencana berdasarkan data curah hujan. Umumnya, data curah hujan harian maksimum dikumpulkan dalam jumlah tahun yang cukup. Metode Gumbel dapat diterapkan dan hasilnya merupakan estimasi kedalaman curah hujan untuk periode ulang tertentu. Langkah-langkah berikut merupakan prosedur umum dalam analisis metode Gumbel [8],

1. Menghitung rata-rata \bar{X} dan deviasi standar S dari N -deret data curah hujan harian maksimum dengan persamaan

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}, \quad (3)$$

dan

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}. \quad (4)$$

2. Menentukan parameter α dan u yang ditentukan melalui

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}S}{\pi}, \quad (5)$$

dan

$$u = \bar{X} - 0,5772\alpha. \quad (6)$$

3. Dengan parameter T adalah sebagai periode ulang (dalam satuan tahun), hitung y_T menggunakan persamaan

$$y_T = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]. \quad (7)$$

4. Tahap akhir dari prosedur Gumbel adalah estimasi akhir curah hujan pada periode ulang tertentu X_T yang dapat diestimasi dengan persamaan

$$X_T + \alpha y_T. \quad (8)$$

Kurva IDF (Persamaan Mononobe)

Untuk menentukan intensitas curah hujan pada waktu tertentu berdasarkan deret data curah hujan, dapat dilakukan dengan mengembangkan kurva IDF. Kurva IDF menggambarkan hubungan antara intensitas curah hujan, durasi, dan frekuensi. Banyak pendekatan yang dapat dilakukan untuk mengembangkan kurva IDF, dan salah satu pendekatan yang dapat dipilih adalah pendekatan Mononobe. Pendekatan mononobe sangat berguna diterapkan jika deret data yang tersedia hanya deret data jangka panjang [10]. Pendekatan Mononobe dapat dijelaskan melalui persamaan

$$I_T = \frac{X_T}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{2/3}, \quad (9)$$

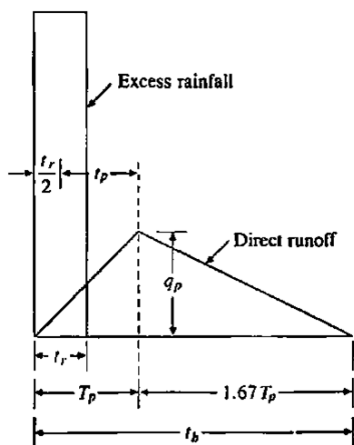
dimana I_T merupakan intensitas curah hujan dari X_T pada t jam durasi curah hujan, dan T menandakan periode ulang.

Hidrograf Satuan Sintetis SCS

Hidrograf satuan sintetis SCS yang terkadang disebut sebagai hidrograf satuan tak berdimensi merupakan hidrograf satuan sintetis yang mengekspresikan debit banjir dalam rasio debit banjir tertentu q terhadap debit puncak q_p dan rasio waktu spesifik t terhadap waktu puncak T_p dalam satuan jam [8]. Rasio ini terdefinisi melalui Tabel. 1 [11] dan hidrograf satuan sintetis SCS (tak berdimensi) ditunjukkan melalui **Gambar 3** [8].

Tabel 1. Rasio t/T_p dan q/q_p [11]

t/T_p	q/q_p	t/T_p	q/q_p	t/T_p	q/q_p
0.0	0.000	1.10	0.980	2.80	0.098
0.1	0.015	1.20	0.920	3.00	0.074
0.2	0.075	1.30	0.840	3.50	0.036
0.3	0.160	1.40	0.750	4.00	0.018
0.4	0.280	1.50	0.660	4.50	0.009
0.5	0.430	1.60	0.560	5.00	0.004
0.6	0.600	1.80	0.420		
0.7	0.770	2.00	0.320		
0.8	0.890	2.20	0.240		
0.9	0.970	2.40	0.180		
1.0	1.000	2.60	0.130		

**Gambar 3.** Hidrograf Satuan Tak Berdimensi SCS [8]

Dalam hidrograf satuan tak berdimensi SCS, q dan q_p dinyatakan sebagai debit tiap satuan centimeter kedalaman curah hujan atau $m^3/(s.cm)$, sementara itu t_r mengindikasikan durasi curah hujan efektif dalam satuan jam. Terminologi *basin lag* t_p mendekati nilai $0.6T_c$, dimana T_c adalah waktu konsentrasi (*the time of concentration*) yang dapat diprediksi dengan pendekatan Kirpich dalam persamaan [11]

$$T_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385}. \quad (10)$$

Pada persamaan (10), L dan S menandakan panjang perjalanan air (m) dan slope rata-rata daerah tangkapan. Kemudian, T_c menandakan waktu konsentrasi suatu daerah tangkapan (dalam satuan menit). Sementara itu, T_p dan q_p secara berurutan ditentukan melalui persamaan

$$T_p = \frac{1}{2}t_r + t_p, \quad (11)$$

dan

$$q_p = \frac{CA}{T_p}. \quad (12)$$

dimana C merupakan nilai koefisien yang bernilai 2.08 (untuk satuan SI), dan A adalah luas daerah tangkapan (km^2).

Runge-Kutta 4th Order Method

Salah satu metode untuk mencari solusi persamaan diferensial biasa (PDB) secara numerik adalah melalui metode Runge-Kutta Orde 4. Untuk fungsi PDB $f(x, y)$, metode Runge-Kutta Orde 4 diformulasikan dalam bentuk [12]

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\Delta x, \quad (13)$$

dimana,

$$k_1 = f(x_i, y_i), \quad (13.a)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}k_1\Delta x\right), \quad (13.b)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}k_2\Delta x\right), \quad (13.c)$$

dan,

$$k_4 = f(x_i + \Delta x, y_i + k_3\Delta x). \quad (13.d)$$

Hubungan Inflow-Outflow-Storage

Analisis pelacakan level kolam datar dimulai dari persamaan kontinuitas, dan digambarkan melalui hubungan inflow $I(t)$ - outflow $Q(S(t))$ - storage $\frac{dS}{dt}$ yang diberikan pada persamaan [4]

$$I(t) - Q(S(t)) = \frac{dS}{dt}. \quad (14)$$

Tipe struktur outflow memberikan estimasi debit outflow yang berbeda-beda. Untuk outflow yang berupa pelimpah tak terkontrol/*uncontrolled spillway*, debit outflow dirumuskan sebagai [8]

$$Q = CLH^{3/2}, \quad (15)$$

dimana C menyatakan koefisien debit, L menyatakan lebar dari pelimpah, dan H menyatakan level muka air di atas pelimpah.

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data curah hujan dan geometri Situ Agathis. Data curah hujan harian maksimum diambil dari alat pengukur curah hujan Universitas Indonesia dalam selang waktu dari 2003 hingga 2016. Di sisi lain, informasi mengenai geometri Situ Agathis diambil secara primer dan sekunder. Situ Agathis memiliki luas daerah tangkapan sekitar $0,376 km^2$ [13]. Penyelidikan lapangan memberikan informasi bahwa Situ Agathis memiliki pelimpah tak terkontrol/*uncontrolled spillway*, yang memiliki lebar 2 meter dan tinggi pelimpah sekitar 1 meter. Dengan menggunakan perangkat lunak *Google Earth Pro*, luas permukaan Situ Agathis adalah sekitar $24718 m^2$, dan memiliki Panjang maksimum aliran

670 m. curah hujan efektif diasumsikan selama 6 jam. Analisis geometri Situ Agathis dilakukan dengan persamaan (1) dan (2) untuk mendapatkan model hubungan of volume-area-depth.

Deret data curah hujan dianalisis dengan distribusi Gumbel untuk beberapa periode ulang dengan persamaan (3) hingga (8). Pada tahap berikutnya, kurva IDF dikembangkan melalui metode Mononobe pada persamaan (9). Dengan demikian maka, analisis debit banjir dapat dieksekusi dengan metode hidrograf satuan sintetis SCS untuk beberapa periode ulang. Persamaan (10) hingga (11) dan **Tabel 1** dapat menjadi rujukan. Hasil dari analisis hidrograf SCS akan dijadikan sebagai parameter inflow yang masuk ke dalam Situ Agthis.

Analisis pelacakan level kolam datar/*level pool routing* dilakukan dengan metode Runge-Kutta Orde 4. Persamaan (13.a) hingga (13.d) akan dimodifikasi sesuai dengan model kontinuitas pada suatu tampungan. Model outflow $Q(S(t))$ bertransformasi sebagai fungsi dari perubahan kedalaman, sehingga $Q(S(t)) = Q(H)$. Kondisi ini juga berlaku pada storage, dimana $dS = A(H)dH$. Sehingga, persamaan (14) bertransformasi menjadi

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t) - Q(H)}{A(H)}, \quad (16)$$

dan fungsi PDB dinyatakan dalam fungsi $f(t_i, H_i)$ atau perubahan level muka air terhadap waktu. Parameter metode Runge-Kutta Orde 4 kemudian ditulis kembali sebagai

$$k_1 = \frac{I(t_i) - Q(H_i)}{A(H_i)}, \quad (17.a)$$

$$k_2 = \frac{I\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t\right) - Q\left(H_i + \frac{1}{2}k_1\Delta t\right)}{A\left(H_i + \frac{1}{2}k_1\Delta t\right)}, \quad (17.b)$$

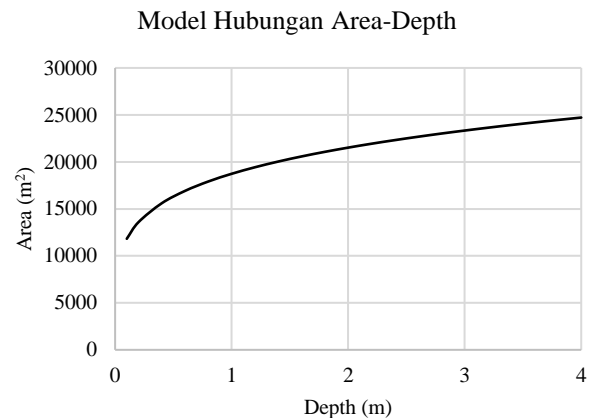
$$k_3 = \frac{I\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t\right) - Q\left(H_i + \frac{1}{2}k_2\Delta t\right)}{A\left(H_i + \frac{1}{2}k_2\Delta t\right)}, \quad (17.c)$$

dan,

$$k_4 = \frac{I(t_i + \Delta t) - Q(H_i + k_3\Delta t)}{A(H_i + k_3\Delta t)}, \quad (17.d)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Penerapan *Google Earth Pro* memberikan informasi mengenai luas permukaan Situ Agathis dan parameter p secara empiris. Dengan informasi ini yang kemudian dipasangkan dengan informasi kedalaman situ, model hubungan *volume-area-depth* dapat dibuat dan Digambarkan pada **Gambar 4-5**.



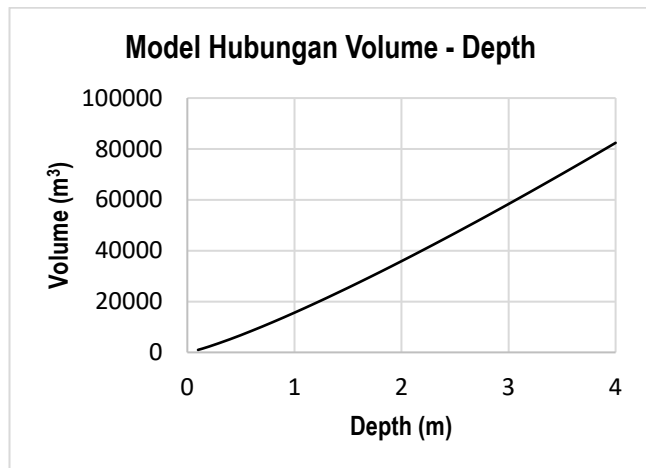
Gambar 4. Model Hubungan Area-Depth Relationship
Sumber: Hasil Analisis

Hubungan tersebut disusun berdasarkan kedalaman situ maksimum yaitu 4 m yang meliputi kedalaman rata-rata sebesar 3 m dan kedalaman tambahan berupa tinggi jagaan di atas pelimpah sebesar 1 m. Dengan demikian, nilai 1 m tersebut akan menjadi nilai ambang batas tinggi muka air maksimum di atas pelimpah.

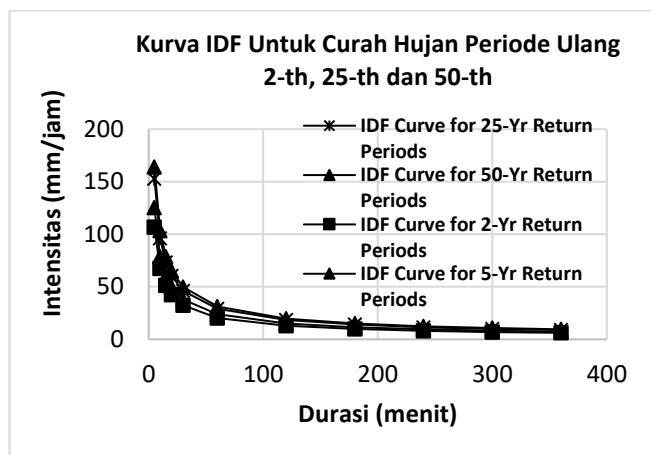
Analisis curah hujan dengan pendekatan Gumbel memberikan nilai curah hujan rencana pada periode ulang 2-th, 25-th, dan 50 th secara berurutan sebesar 117.6 mm, 168,1 mm, dan 180,6 mm. nilai curah hujan rencana tersebut akan dikonversi berdasarkan asumsi koefisien limpasan (C) sebesar 0,5. Persamaan Mononobe memberikan kurva IDF dari curah hujan terkonversi ini sepanjang 6 jam. **Gambar 6** menggambarkan kurva IDF berdasarkan pendekatan Mononobe.

Kurva IDF, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 6** akan menjadi pertimbangan dasar dalam analisis hidrograf satuan SCS. Analisis ini akan menghasilkan nilai puncak limpasan pada masing-masing periode ulang. Pada periode ulang 50-th, puncak debit yang diestimasi menggunakan hidrograf satuan sintetis SCS adalah sekitar $1.57 \text{ m}^3/\text{s}$, dan setiap tahun, probabilitas kejadiannya adalah 2% atau 0.02. **Gambar. 7** memberikan informasi hidrograf satuan sintetis SCS untuk tiap periode ulang. Berdasarkan hidrograf tersebut, perbedaan nilai debit puncak antara periode ulang

25-th dan 50-th tidak signifikan. Transformasi hidrograf atuan ini akan menjadi parameter inflow pada analisis berikutnya. Analisis *level pool routing* dilakukan dengan menerapkan metode Runge-Kutta Orde 4 yang memberikan luaran berupa hidrograf inflow dan outflow untuk tiap periode ulang. **Gambar 8** hingga **Gambar 10** merupakan hidrograf inflow-outflow berdasarkan analisis *level pool routing* dengan menggunakan metode Runge-Kutta Orde 4.



Gambar 5. Model Hubungan Volume-Depth
Sumber: Hasil Analisis

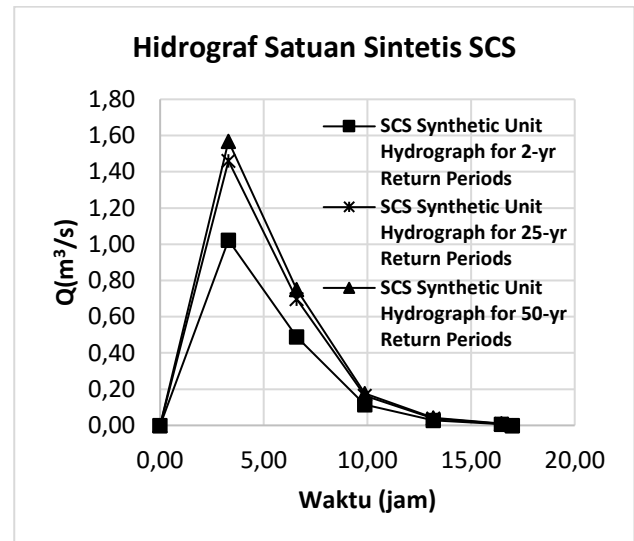


Gambar 6. Kurva IDF
Sumber: Hasil Analisis

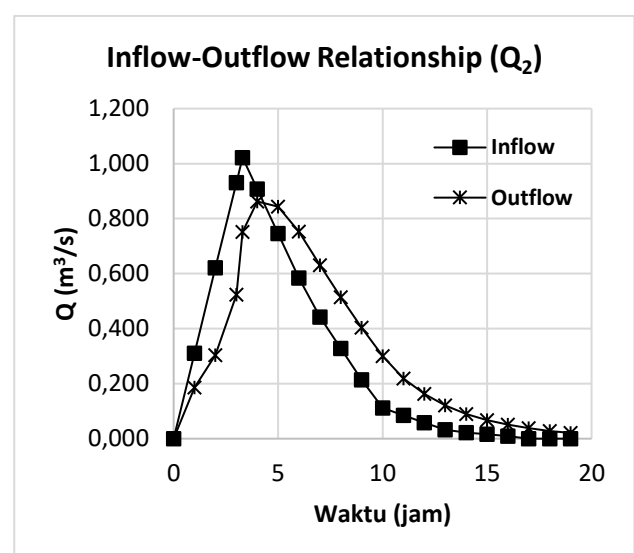
Analisis outflow menggunakan persamaan (15) dimana koefisien debit (C) diambil 1.17.

Analisis akhir yang dilakukan adalah menentukan fluktuasi muka air pada Situ Agathis ketika fenomena banjir terjadi untuk setiap periode ulang. Analisis ini dilakukan dengan mengombinasikan hubungan area-depth dan hasil analisis *level pool routing*. Berdasarkan informasi di lapangan, kedalaman rata-rata Situ Agathis adalah 3 m, dan akan meningkat akibat adanya tinggi jagaan di atas

pelimpah, yang nilainya 1 m. Fluktuasi muka air digambarkan pada **Gambar 11** dimana gambar tersebut menjelaskan bahwa pada periode ulang 50-th, tinggi muka air maksimum adalah 3.7 m. Mengingat nilai ambang batas adalah 4 m, maka kapasitas Situ Agathis masih dinilai cukup.



Gambar 7. Hidrograf Satuan SCS
Sumber: Hasil Analisis



Gambar 8. Inflow-Outflow Relationship (Q_2)
Sumber: Hasil Analisis

Penekanan pada fluktuasi muka air juga dapat dihubungkan pada model hubungan *volume-depth* yang telah dijelaskan melalui **Gambar 5**. Sementara itu, kebutuhan akan tampungan Situ Agathis dapat dikalkulasi melalui luas daerah grafik inflow yang dipotong oleh grafik outflow (contoh daerah yang diarsir pada **Gambar 10**).

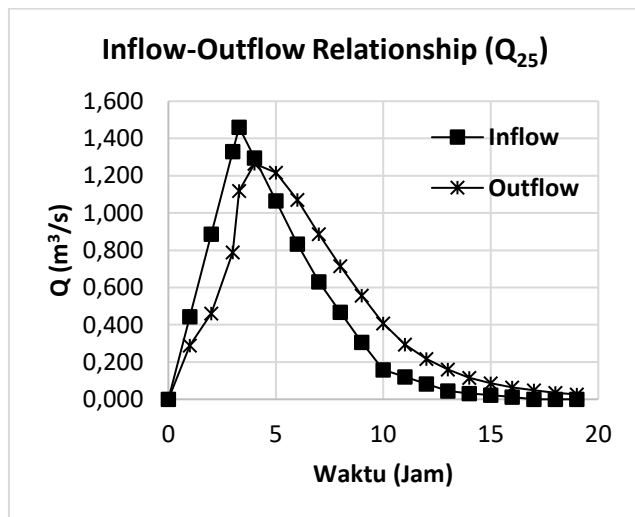
Untuk hidrograf inflow-outflow periode ulang 50-th yang telah dibuat dapat disusun model matematikannya secara berurutan sebagai

$$y = 0.000003x^6 - 0.0002x^5 + 0.0027x^4 - 0.0128x^3 - 0.0949x^2 + 0.8056x - 0.0806, \quad (18)$$

dan,

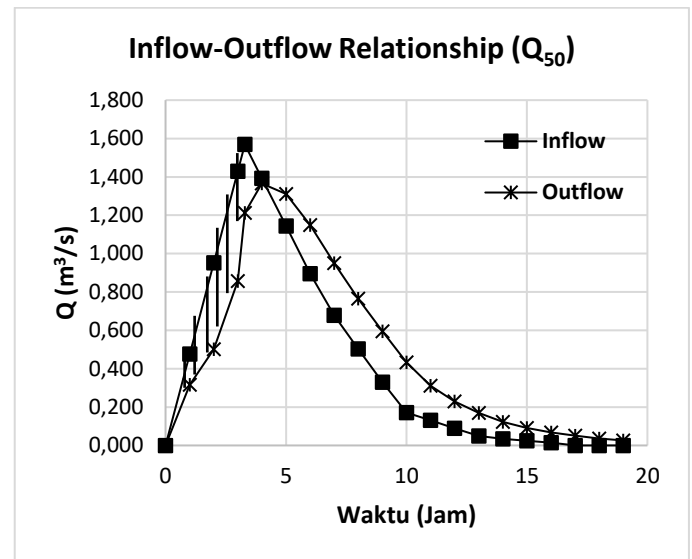
$$y = 0.000004x^6 - 0.0003x^5 + 0.0061x^4 - 0.0593x^3 + 0.2069x^2 + 0.1017x - 0.0015. \quad (19)$$

Kedua model tersebut diintegrasikan sepanjang 4 jam (jam saat grafik ini berpotongan) dan didapat nilai selisih sebesar 4400 m³ sebagai kebutuhan tampungan/*storage* Situ Agathis. Kedalaman 3 m menyatakan kondisi awal/*initial condition* dari simulasi, sehingga ketersediaan tampungan dihitung berdasarkan deviasi tampungan antara kedalaman 3 m dan kedalaman maksimumnya (4 m). Deviasi volume tampungan pada kedalaman tersebut mengindikasikan ketersediaan tampungan adalah sekitar 24000 m³ yang didapat dari grafik hubungan *depth-volume* (Gambar. 5).



Gambar 9. Inflow-Outflow Relationship (Q_{25})

Sumber: Hasil Analisis



Gambar 10. Inflow-Outflow Relationship (Q_{50})

Sumber: Hasil Analisis

4. Kesimpulan

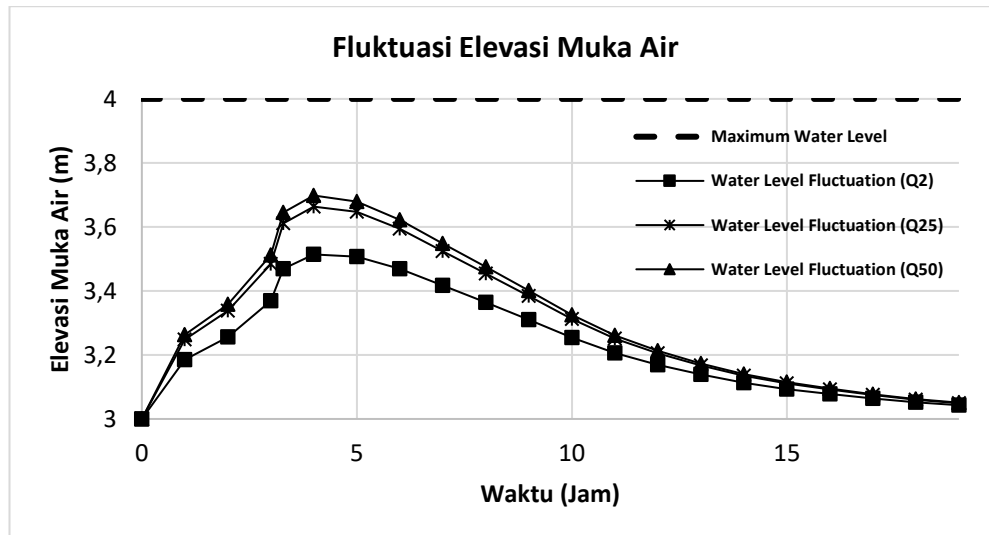
Berdasarkan keseluruhan analisis, penelitian ini menyimpulkan bahwa Situ Agathis di Universitas Indonesia memiliki kemampuan yang cukup kuat dalam menangani fenomena hidrologi jangka pendek yang dalam hal ini adalah banjir. Untuk puncak banjir pada periode ulang 50-th, kebutuhan tampungan/*storage* adalah sekitar 4400 m³. Di satu sisi, hasil analisis model geometri menunjukkan kapasitas tampungan/*storage* Situ Agathis adalah sebesar 24000 m³. Hal ini diperkuat juga dengan hasil analisis fluktuasi muka air dimana muka air maksimum di atas pelimpah adalah sebesar 0,8 m, dan nilai ini masih di bawah nilai ambang batas.

Penelitian ini juga memberikan kesimpulan metode Runge-Kutta Orde 4 sangat baik dalam menyimulasi persamaan diferensial biasa (PDB). Metode Runge-Kutta Orde 4 hasil yang relative stabil dari simulasi dan hal ini ditandai dengan kesesuaian karakteristik hidrograf inflow-outflow secara teori. Persamaan kontinuitas yang diturunkan dapat dicari solusinya secara numerik, sehingga pendekatan metode numerik lainnya, seperti metode *Heun*, *Cash-Karp*, dan *Laurenson-Pilgrim* dapat diterapkan pada penelitian berikutnya sebagai uji pembandingan. Penerapan metode tersebut juga perlu diuji coba sebagai kesatuan sitem *Cascade Pond* keseluruhan pada pengembangan penelitian berikutnya.

Dikarenakan banyaknya limitasi dalam analisis terutama dalam hal koefisien limpasan, maka analisis tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan tata guna lahan. Jika data pengukuran debit langsung di lapangan

tersedia, analisis inflow dapat dilakukan dengan beberapa metode dan dipilih hasil yang mendekati hasil pengukuran lapangan. Lebih lanjut lagi, dokumentasi primer berupa

keadaan Situ Agathis ketika banjir terjadi dapat dijadikan sumber tambahan untuk konfirmasi dan validasi hasil.



Gambar 11. Fluktuasi Elevasi Muka Air

Sumber: Hasil Analisis

Daftar Pustaka

- [1] M. Bandara, "Catchment Ecosystems and Village Tank Cascade in the Dry Zone of Sri Lanka A Time-Tested System of Land and Water Resource Management," in *Strategies for River Basin Management*, Lundqvist, Lohm, and Falkenmark, Eds. Dordrech: D. Reidel Publishing Company, 1985, pp. 99–113.
- [2] G. De Martino, F. De Paola, N. Fontana, G. Marini, and A. Ranucci, "Experimental Assesment of Level Pool Routing in Preliminary Design of Flood Plain Storage," *Sci. Total Environ.*, vol. 416, pp. 142–147, 2011.
- [3] T. Haktanir and H. Ozmen, "Comparison of Hydraulic and Hydrologic Routing on Three Long Reservoirs," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 123, pp. 153–156, 1997.
- [4] C. Zoppou, "Reverse Routing of Flood Hydrographs Using Level Pool Routing," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 4, pp. 184–188, 1999.
- [5] M. Fiorentini and S. Orlandini, "Robust Numerical Solution of the Reservoir Routing Equation," *Adv. Water Resour.*, vol. 59, pp. 123–132, 2013.
- [6] C. Deng, P. Liu, Y. Liu, Z. Wu, and D. Wang, "Integrated Hydrologic and Reservoir Routing Model for Real-Time Water Level Forecast," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 20, no. 9, 2015.
- [7] D. Sutjiningsih, "Water Quality Index for Determining the Development Threshold of Urbanized Catchment Area in Indonesia," *Int. J. Technol.*, vol. 1, pp. 145–159, 2017.
- [8] V. Te Chow, D. Maidment, and L. W. Mays, *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Education, 1988.
- [9] M. Hayashi and G. Van Der Kamp, "Simple Equations to Represent the Volume-Area-Depth Relations of Shallow Wetlands in Small Topographic Depressions," *J. Hydrol.*, vol. 237, pp. 74–85, 2000.
- [10] I. M. Kamiana, *Teknik Perhitungan Debit Rencana Bangunan Air*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2011.
- [11] K. Subramanya, *Engineering Hydrology*, 4th ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2013.
- [12] S. Chapra and R. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, 7th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [13] A. S. Megantara, "Penentuan Klasifikasi Keren-tanan Wilayah Kampus Universitas Indonesia-Depok Terhadap Perubahan Tutupan Lahan Kedap Air Dengan Menggunakan Metode 'Watershed Vulnerability Analysis,'" Universitas Indonesia, 2011.